

На правах рукописи



Свистунов Николай Андреевич

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СИЛОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ
ПОД НАГРУЗКОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ).

Научный руководитель: Степанов Владимир Михайлович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Калинин Вячеслав Федорович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Гамбовский государственный технический университет»,
профессор кафедры «Электроэнергетика»

Авдошин Вадим Сергеевич
кандидат технических наук,
ООО «ГИПЕРГЛОБУС» г. Москва,
главный инженер

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2020г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.271.12, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г.Тула, пр. Ленина, 92, ауд.9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета и на сайте <http://tsu.tula.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2020г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета



Хмельёв
Роман Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Нарастание объема износа электрооборудования и отсутствие возможности его восстановления вводит современную электроэнергетику в зону повышенного риска, технологических отказов и аварий не только электрооборудования, но и систем автоматического регулирования, релейной защиты и противоаварийного управления, т.е. электротехнических устройств. Экономическая необходимость решения возникших проблем привела к разработке и реализации ряда научно-технических программ, в которых эксплуатация, ремонтное обслуживание и реновация изношенного электрооборудования и электротехнических устройств выделяются в приоритетное направление развития электроэнергетического комплекса.

Большой износ электрооборудования и электротехнических устройств, эксплуатируемых на силовых подстанциях, требует решения вопроса их диагностики под нагрузкой для повышения эффективности функционирования, а также продления срока службы и безаварийной эффективной их работы за счёт формирования требуемых режимов работы силовых подстанций.

Данный вопрос рассматривался в научных работах Степанова В.М., Борисова П.А., Андреева К.А., Иванова Д.А., Судавного А.С., где они подтверждают актуальность данного научного направления, однако их методики не учитывали в комплексе возможности непрерывного контроля технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой без выведения их оборудования из работы, а так же не предлагали комплексного подхода не только к диагностическому параметру, но и эффективному управлению режимами работы электрооборудования и электротехнических устройств, входящих в систему силовых подстанций, обеспечивающими увеличение их срока службы.

В рамках государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632р происходит цифровизация и автоматизация электросетевого комплекса, что предъявляет к решению выше указанной научной задачи дополнительные требования по совместимости с используемыми принципами и технологиями

Цель выполнения диссертационной работы: диагностика электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой, обеспечивающая продление их срока службы путём управления температурным режимом работы силовых подстанций за счёт прогнозирования формирования остаточного ресурса на основе комплексного диагностического параметра – тангенса угла диэлектрических потерь, учитывающего характеристики переходных процессов и режимов их работы для повышения надёжности и эффективности функционирования силовых подстанций.

Объект исследования: электрооборудование и электротехнические устройства диагностики и управления режимами работы силовых подстанций под нагрузкой, их функциональные связи и параметры.

Предметом исследования являются физические процессы, протекающие в электрооборудования и электротехнических устройствах силовых подстанций, влияющие на формирование остаточного ресурса.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы электромеханики и теоретических основ электротехники, численные методы, методы математической статистики, теория измерения физических величин, теория надёжности

технических систем, методы диагностики под нагрузкой, экстраполяционные методы прогнозирования, планирование эксперимента, методы оптимизации. Проверка теоретических результатов осуществлялась путём численных и натуральных экспериментов.

Для достижения поставленной цели сформированы и должны быть решены следующие **задачи исследования:**

1) Анализ конструктивных схем устройств и методов диагностирования технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой.

2) Обоснование тангенса угла диэлектрических потерь как комплексного параметра диагностики и прогнозирования формирования остаточного ресурса электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций.

3) Определение зависимости для расчёта комплексного диагностического параметра – тангенса угла диэлектрических потерь, учитывающего характеристики переходных процессов и режимов работы для повышения надёжности и эффективности функционирования силовых подстанций.

4) Разработка и исследование математической модели объекта с распределёнными параметрами для определения формирования температурной среды при эксплуатации электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций.

5) Определение условий реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электрооборудования, электротехнических устройств диагностики, контроля и управления режимами работы силовых подстанций под нагрузкой, обеспечивающих рациональные режимы работы электрооборудования и электротехнических устройств, а также их техническое состояние.

6) Разработка новых технических решений по повышению надёжности и эффективности функционирования электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций.

7) Разработка методики прогнозирования формирования остаточного ресурса электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций с целью обеспечения своевременного планово-предупредительного ремонта на основе диагностики технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой и эффективного управления их режимами работы.

8) Численные и экспериментальные исследования технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций и режимов их работы при применении новых технических решений.

На защиту выносятся:

1) Закономерности формирования остаточного ресурса электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций и характеризующий его комплексный диагностический параметр – тангенса угла диэлектрических потерь.

2) Методика определения функциональных связей электрооборудования и электротехнических устройств диагностики под нагрузкой и управления режимами работы силовых подстанций.

3) Способ управления режимами работы и охлаждения электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций, основанный на прогнозировании формирования их срока службы.

4) Условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности электрооборудования, электротехнических устройств диагностики под нагрузкой и управления режимами работы силовых подстанций, обеспечивающих рациональные режимы работы электрооборудования и электротехнических устройств и формирование требуемого уровня службы.

Научная новизна заключается в определении рациональных параметров и закономерностей формирования управляющих воздействий электротехнических устройств диагностики и управления режимами работы силовых подстанций под нагрузкой, обеспечивающих требуемый уровень надёжности и эффективности функционирования электрооборудования и электротехнических устройств за счёт установленных закономерностей формирования их срока службы и прогнозирования планово-предупредительного ремонта.

Она представлена следующими результатами:

1) Получены зависимости для расчёта рациональных параметров электротехнических устройств контроля и управления режимами работы силовых подстанций.

2) Установлены способы формирования закономерностей управляющих воздействий в электротехнических устройствах контроля и управления режимами работы силовых подстанций под нагрузкой, учитывающие комплексный диагностический параметр технического состояния – тангенс угла диэлектрических потерь и характеристики переходных процессов.

3) Разработана методика прогнозирования технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций, учитывающих физические процессы, протекающие в них и влияющие на формирование остаточного ресурса с учётом их технических особенностей.

4) Обоснованы структура и рациональные параметры системы диагностики технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой и управления режимами их работы.

5) Разработаны новые технические решения электротехнических устройств, обеспечивающие непрерывного контроль и управление режимами работы электрооборудования силовых подстанций в условиях эксплуатации за счёт регулирования режима охлаждения электрооборудования силовых подстанций.

Практическая значимость результатов работы. Разработаны новые технические решения по обеспечению непрерывного контроля и управления режимами работы и регулированию режима охлаждения электрооборудования силовых подстанций в условиях эксплуатации, а также методика прогнозирования планово-предупредительного ремонта, учитывающие в комплексе физические процессы, протекающие в электротехнических устройствах и внешние факторы, влияющие на формирование остаточного ресурса с учётом их технических особенностей.

Реализация результатов работы.

Основные научно-практические результаты диссертационной работы использованы в НИОКР Тульского государственного университета № 1121802 ООО «СМП Центр» - «Повышение эффективности диагностики технического состояния

силовых подстанций под нагрузкой» и № 1122001 АО «Тулэнергоремонт» - «Повышение эффективности функционирования системы резервирования возбуждения генераторов электрической энергии для тепловых электростанций».

Результаты работы использованы в учебных курсах «Электропитающие сети и системы», «Электроснабжение промышленных предприятий», «Электроэнергетика», «Специальные методы анализа параметров устройств автоматического управления и релейной защиты в электроэнергетике» и «Релейная защита и системная автоматика» на кафедре «Электроэнергетика» Тульского государственного университета.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях: Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2016» в рамках XIV Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2016 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2017» в рамках XV Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2017 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2018» в рамках XVI Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2018 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2019» в рамках XVII Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2019 г.), Международной научно-технической конференции «Энергосбережение-2020» в рамках XVIII Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2020 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных публикаций, где 8 из них в журналах, рекомендованных ВАК РФ, получены 2 патента РФ и подана 1 заявка на патент на полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 103 наименований, содержит 50 рисунков и 5 таблиц. Общий объём – 132 страниц.

Личный вклад автора. Разработаны методика определения структуры функциональных связей, математические модели комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой, получены зависимости, определяющие их рациональные параметры, учитывающие комплексный диагностический параметр технического состояния – тангенс угла диэлектрических потерь и характеристики переходных процессов, установлены закономерности формирования в них переходных процессов, управляющих воздействий и условия реализуемости их математических моделей, обеспечивающих требуемый уровень эффективности и надёжности функционирования систем. Проведены численные и экспериментальные исследования подтвердившие работоспособность комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой и правильность теоретических исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, решению которых посвящена диссертация, излагаются подход и методы исследования, отмечаются научная новизна, практическая значимость работы, а также апробация работы, приведена структура диссертации.

В первой главе проведён анализ конструктивных схем, методов моделирования, расчёта параметров, диагностики и прогнозирования технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой, а также обоснованы необходимость разработки новых технических решения по обеспечению непрерывного контроля и управления режимами работы и регулированию режима охлаждения электрооборудования силовых подстанций в условиях эксплуатации, а также методика прогнозирования планово-предупредительного ремонта, учитывающие в комплексе физические процессы, протекающие в электротехнических устройствах и внешние факторы, влияющие на формирование остаточного ресурса с учётом их технических особенностей.

Во второй главе определены зависимости для расчёта комплексного диагностического параметра – тангенса угла диэлектрических потерь, учитывающего характеристики переходных процессов и режимов работы для повышения надёжности и эффективности функционирования силовых подстанций.

Оценка остаточного ресурса и уточнение текущего состояния токоведущих частей электрооборудования и электротехнических устройств выполнены в следующей последовательности:

а) путем численного решения модели старения в виде следующего дифференциального уравнения относительно температуры изоляции токоведущих частей (1) с использованием всей совокупности исходных данных осуществляется математическое моделирование процесса старения и определяется ее расчетный ресурс (τ), т.е. время от момента ввода в эксплуатацию до достижения предельного (отказового) состояния;

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} = & \alpha_0 \cdot \exp[\gamma \cdot \theta(t)] \cdot \\ & \cdot \frac{\theta(t) - z(t) - v \cdot y(t)}{1 - \xi \cdot [\theta(t) - z(t) - v \cdot y(t)]} + \frac{dz}{dt} \cdot \\ & \cdot \frac{1}{1 - \xi \cdot [\theta(t) - z(t) - v \cdot y(t)]} + \\ & + \frac{[\theta(t) - z(t)] \cdot \frac{dy}{dt}}{[1 - \xi \cdot [\theta(t) - z(t) - v \cdot y(t)]] \cdot y(t)} \end{aligned} \quad (1)$$

б) определяется чувствительность расчетного ресурса к начальным данным;

в) оценивается остаточный ресурс (τ_r) как разность между расчетным ресурсом и наработкой, т.е. продолжительностью периода эксплуатации на момент прогнозирования (T):

$$\tau_r = \tau - T \quad (2)$$

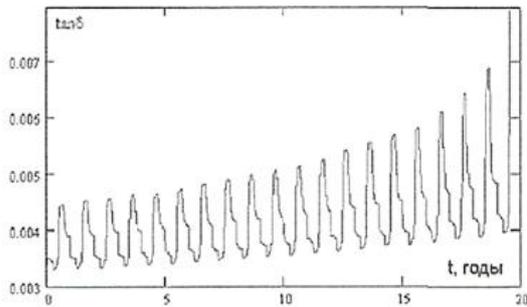


Рис. 1. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ от времени старения t

Расчетный алгоритм составлен так, что одновременно с температурой рассчитывается и $tg\delta$ - рис. 1.

Проведено моделирование объекта с распределёнными параметрами для определения формирования температурной среды при эксплуатации электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций.

Объект описан дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка – так называемым уравнением теплопроводности или уравнением Фурье

$$\frac{dT}{dt} = a\Delta T, \quad (3)$$

где a – коэффициент теплопроводности, который зависит от физических свойств среды, а выражение

$$\Delta T = \frac{dT^2}{dx^2} + \frac{dT^2}{dy^2} + \frac{dT^2}{dz^2} \quad (4)$$

является оператором Лапласа в декартовой системе координат для трёхмерной пространственной области определения температурного поля $T=T(x,y,z,t)$.

Определены зависимости для расчёта параметров элементов устройства генерации комплексной системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой. Накопитель выбирается с учётом суммарной мощности питающихся от него потребителей. Параметры измерительно-генерирующих обмоток рассчитываются с учётом требуемого уровня чувствительности выраженного минимальной разностью магнитной индукции, которая выбирается на основе минимальной разности температуры рабочей среды при которой регулируется скорость вращения вентиляторной установки.

Разработана структура функциональных связей комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой, которая обеспечивает эффективный контроль, диагностику, управление и функционирование в комплексе на основе использования информационной, структурной и временной избыточности.

Формирование управляющих воздействий распределением контролируемых параметров и эффективностью использования электротехнических устройствах контроля и управления режимами работы силовых подстанций устанавливается на основе нейронной сети, которая выполняет функцию модели измеряемых и управляемых потоков, а также реакции его на изменение состояния анализирующих элементов и измеряемых и управляющих систем при известных контролируемых параметрах, что позволило получить их цифровую модель.

На основании анализа использования нейронной сети с применением разработанного математического аппарата проведено моделирование режимов работы комплексной системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой с использованием приложения MatLabSimPowerSystems.

На рис. 2 изображена структура измерительно-информационно-управляющего модуля – ИИУМ который разделён на две секции взаимосвязанные через общий

исполнительный элемент – накопитель, имеющий обратную связь с обеими секциями. Секция относящаяся к контролю режимов работы электрооборудования и электротехнических устройств включает датчики: D_b – датчик контроля режима работы выключателей; D_p – датчик контроля режима работы разъединителей; $D_{ст}$ – датчик контроля режима работы силовых трансформаторов; $D_{шр}$ – датчик контроля режима работы шунтирующих реакторов; $D_{ит}$ – датчик контроля режима работы измерительных трансформаторов тока и напряжения; $D_{нэ}$ – датчик контроля режима работы накопителя электрической энергии; D_n – датчик контроля режима работы преобразователя электрической энергии с устройством дозированного электропитания при её распределении по электроприёмникам. Секция относящаяся к контролю режима охлаждения электрооборудования и электротехнических устройств включает датчики: D_t – датчики контроля температуры; $D_{эд}$ – датчик контроля режима работы реактивно-вентильного электродвигателя; $D_{нэ}$ – датчик контроля режима работы накопителя электрической энергии; $D_{ву}$ – датчик контроля режима работы вентиляторной установки.

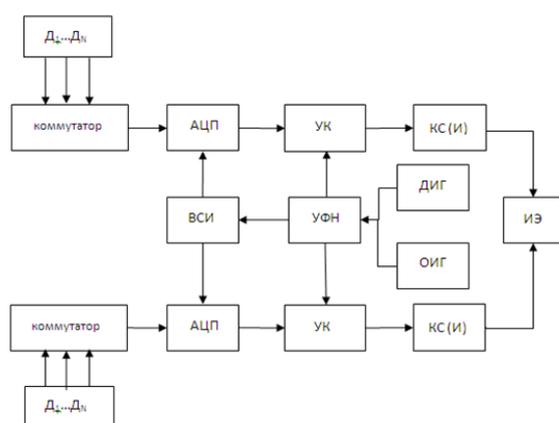


Рис. 2. Структура измерительно-управляющего модуля

внутренний генератор ИИУМ формирует токовые импульсы, которые задают скорость выдачи последовательного кода с выхода АЦП устройства кодирования УК, преобразующего двойной последовательный код с выхода АЦП в сигнал, в котором «0» и «1» представлены импульсами разной длительности, КС – канал связи (интерфейс), через который сформированные управляющие воздействия передаются исполнительным элементам ИЭ для управления режимами работы электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций, где рациональная структура функциональных связей конструктивной схемы обеспечивает требуемые уровни эффективности и надёжности их функционирования.

Разработана методика прогнозирования формирования остаточного ресурса электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций с целью обеспечения своевременного планово-предупредительного ремонта на основе диагностики технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой и эффективного управления их режимами работы.

Рациональная структура функциональных связей обеспечивает в комплексе требуемый уровень эффективности функционирования следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой, на основе которой разработана её топология на

уровне новых технических решений, и, определён уровень и условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности.

Требуемый уровень надёжности определяет вероятность отказа, соответствующая требуемому техническому уровню:

$$q_n = \frac{q_c}{k_y}, \quad (5)$$

где q_n , q_c - вероятности отказа системы существующего и нового технического уровня; k_y – коэффициент технического уровня.

Коэффициент технического уровня определяется следующей зависимостью

$$k_y = \frac{1}{5} \left(\frac{V_{онс} + V_{пнн} + V_{уен} + P_{рн} + P_{дс}}{V_{онн} + V_{птс} + V_{уес} + P_{рс} + P_{дн}} \right) \quad (6)$$

где $V_{онс}$ и $V_{онн}$ - скорость образования неисправностей электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций в существующих системах(с) и нового технического уровня(н); $V_{пнн}$ и $V_{птс}$ - скорости формирования переходных процессов в электротехнических системах контроля и селективности силовых подстанций под нагрузкой; $V_{уен}$ и $V_{уес}$ - скорости формирования управляющих воздействий электротехнических систем контроля и управления силовых подстанций; $P_{рн}$ и $P_{рс}$ - мощность резервируемой электроэнергии; $P_{дс}$ и $P_{дн}$ - мощность дозированного питания электроэнергией элементов электротехнических систем силовых подстанций.

Условия реализуемости конструкционной и функциональной её надёжности имеют вид:

$$\frac{k_{п}^3}{k_m^2 k_o^2} F_{\delta}^2 \leq F_n^2 ; \quad \frac{t_{\deltaп} T_{ос}}{T_{он}^2} \leq q_{нм} \quad (7)$$

где F_{δ} – действующие усилие на элемент конструкции; F_n – нормативная нагрузка на элементы конструкции; $T_{ос}$, $T_{он}$ – среднее время наработки на отказ существующих систем и нового технического уровня; $t_{\deltaп}$ – допустимое время простоя.

Исходя из структуры взаимосвязанных элементов комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой и равной вероятности анализов по общеизвестным зависимостям структурной надёжности установлена требуемая их вероятность отказов $q_n = q_i(\phi_i)$ и уровень показателей конструктивной и функциональной надёжности (табл.1)

Таблица 1

Показатель надежности	$q_{нм}$	$P_{нм}$	$\lambda_{нм}$, 1/ч	$t_{нм}$, ч	$T_{онм}$, ч	$t_{дп}$, ч
электромеханические элементы	0,0063	0,9957	0,0032	17,45	503,21	1,54
электротехнические элементы	0,0077	0,9973	0,0027	18,29	628	1,77

Показатель надежности	$k_{ТИИМ}$	$P_y(t)$	$k_{П}$	K_H	k_m	K_0	$t_{МП}$	$k_{ММ}$
электромеханические элементы	0,969	0,03	1,51	1,6	0,995	0,65	282,1	13
электротехнические элементы	0,981	0,009	1,83	1,99	0,995	0,66	257,4	15

В третьей главе разработаны новые технические решения реализующие топологию комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой и обобщенная структура их функциональных связей.

На рисунке 3 представлена схема устройства непрерывного контроля и управления режимами работы электрооборудования силовой электрической подстанции в условиях эксплуатации.

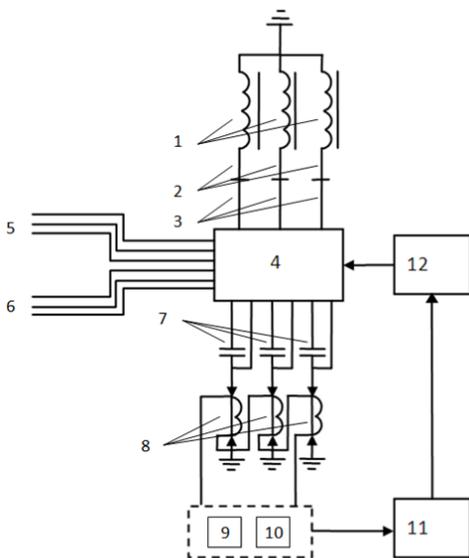


Рис. 3

Устройство непрерывного контроля и управления режимами работы электрооборудования силовой электрической подстанции в условиях эксплуатации содержит 1,2 активную часть высоковольтного аппарата, 3 щупы, подключённые к активной части высоковольтного аппарата и к входу коммутатора 4. Щупы 5 подключены к высоковольтным аппаратам без встроенных ёмкостных делителей и к входу коммутатора 4. Щупы 6 подключены к высоковольтным аппаратам с встроенным ёмкостным делителем и к входу коммутатора 4. Выходы коммутатора 4 соединены с входами измерительных трансформаторов 8 напрямую, в обход ёмкостных делителей 7. Выходы регистратора частичных разрядов 9 и анализатора диэлектрических потерь и ёмкости 10 соединены с входом аналогово-цифрового преобразователя 11. Выход аналогово-цифрового преобразователя 11 соединён с входом микропроцессорного блока управления 12, выходы которого в свою очередь соединены с входом коммутатора 4 и с входом тиристорного преобразователя частоты с перестраиваемой топологией 13.

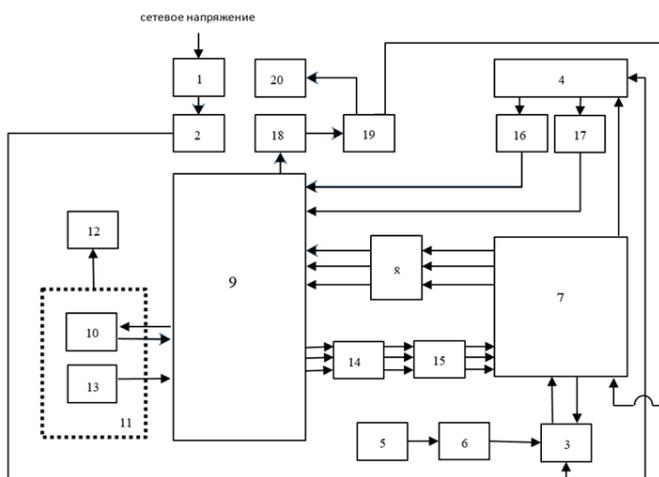


Рис. 4

На рисунке 4 представлена схема устройства регулирования режима охлаждения электрооборудования силовой электрической подстанции.

Устройство регулирования режима охлаждения электрооборудования силовой электрической подстанции содержит выпрямитель 1, выход которого связан с входом фильтра 2, выход которого связан с входом панели управления 3 и входом генератора

квадратурных токов 4, выход датчика температуры 5 связан со входом аналого-цифрового преобразователя с микропроцессором 6, выход которого связан со входом

панели управления 3, которая имеет двухстороннюю связь с микропроцессорной системой 7, выходы которой связаны с входами блока драйверов 8, выходы которого связаны с входами вентильного коммутатора 9, который имеет двухстороннюю связь с фазными обмотками 10 вентильно-реактивного генератора 11, выход которого связан с входом вентильной установкой 12, выход обмотки контроля 13 связаны с входом коммутатора 9, который имеет выходы, связанные с входами фильтра 14, выходы которого связаны с входами компаратора 15, выходы которого связаны с входами микропроцессорной системы 7, выход которой связан с входом генератора квадратурных токов 4, выходы которого связаны с входами источников тока 16 и 17, выходы которых связаны с входами коммутатора 9, выход которой связан с входом фильтра 18, выход которого связан с входом блока контроля качества генерируемой электроэнергии 19, выходы которого связаны с входами микропроцессорной системы 7 и накопителя электрической энергии 20. В зависимости от требований объекта к конфигурации системы охлаждения устройство может содержать один вентильно-реактивный генератор и вентильную установку для всего контура, либо несколько вентильно-реактивных генераторов и вентильных установок меньшей мощности с возможностью регулирования их режимов работы независимо друг от друга, распределенных по очагам возрастания температуры окружающей среды.

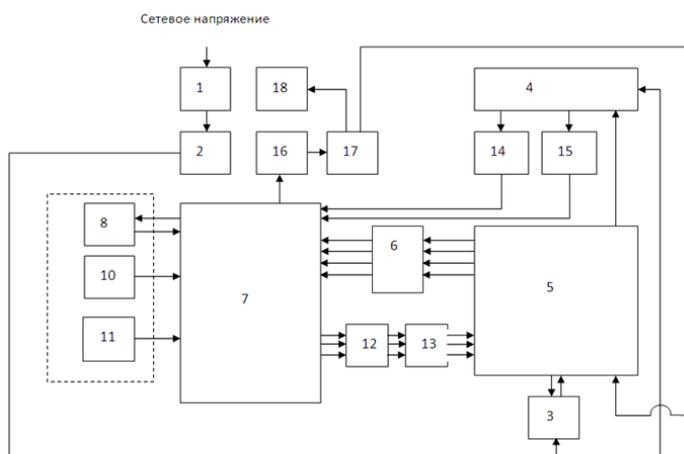


Рис. 5

связаны с входами блока драйверов 6, выходы которого связаны с входами вентильного коммутатора 7, который имеет двухстороннюю связь с фазными обмотками 8 реактивно-вентильного генератора 9, имеющего возможность работать в двигательном режиме, выход обмотки контроля 10 и выход измерительно-генерирующей обмотки 11 связаны с входом коммутатора 7, который имеет выходы, связанные с входами фильтра 12, выходы которого связаны с входами компаратора 13, выходы которого связаны с входами микропроцессорной системы 5, выход которой связан с входом генератора квадратурных токов 4, выходы которого связаны с входами источников тока 14 и 15, выходы которых связаны с входами вентильного коммутатора 7, выход которого связан с входом фильтра 16, выход которого связан с входом блока контроля качества генерируемой электроэнергии 17, выходы которого связаны с входами микропроцессорной системы 5 и накопителя электрической энергии 18.

На рисунке 5 представлена схема устройства генерации при торможении реактивно-вентильного электродвигателя.

Сетевое напряжение подают на выпрямитель 1, выход которого связан с входом фильтра 2, выход которого связан с входом панели управления 3 и входом генератора квадратурных токов 4, панель управления 3 имеет двухстороннюю связь с микропроцессорной системой 5, выходы которой

За счёт использования квадратурных сигналов в системе генерации при торможении реактивно-вентильного электродвигателя ток с катушек, следовательно, и уровень чувствительности увеличиваются в два раза, что сокращает требуемое количество витков и позволяет избежать увеличения массогабаритных размеров реактивно-вентильного электродвигателя.

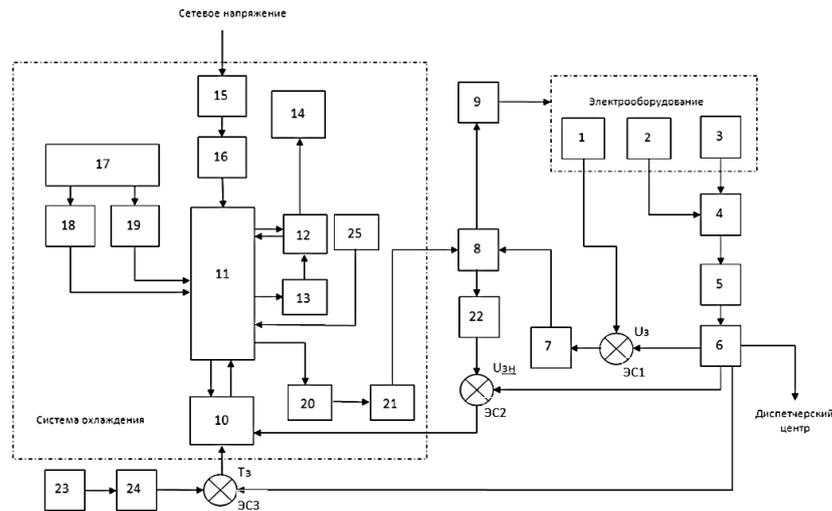


Рис.6. Обобщённая структурная схема функциональных связей комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой.

На основании анализа использования нейронной сети и применением разработанного математического аппарата проведено моделирование режимов работы комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой с использованием приложения MatLabSimPowerSystems, в результате которого получена обобщенная структурная схема (рис.6).

В состав обобщённой структурной схемы входит: 1 - датчик напряжения; 2 - детектор частичного разряда; 3 - анализатор диэлектрических потерь и ёмкости; 4 - аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором; 5 - интерфейс; 6 - компьютер; 7 –блок управления накопителя; 8 - накопитель; 9 - перестраиваемый ТПЧ; 10 – микропроцессорная система управления; 11 – вентильный коммутатор; 12 – реактивно-вентильный электродвигатель, 13 – механическое тормозное устройство; 14 – вентиляционная установка; 15 – выпрямитель; 16 – фильтр; 17 – генератор квадратурных сигналов; 18, 19 – источники тока; 20 – фильтр; 21 – блок контроля качества генерируемой электроэнергии; 22 – датчик напряжения накопителя; 23 – датчики температуры; 24 –

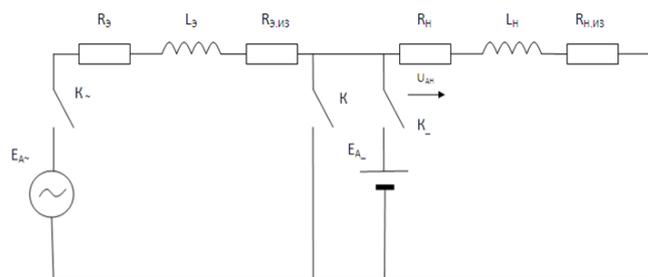


Рис. 7. Обобщённая однофазная эквивалентная схема замещения

с аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором; 25 – измерительно-генерирующие обмотки; ЭС1 – элемент сравнения напряжения сети; ЭС2 – элемент сравнения напряжения накопителя; ЭС3 – элемент сравнения температуры.

На основе анализа топологии (рис.3-рис.6) и конструктивных схем,

методов моделирования, расчёта параметров, диагностики и прогнозирования технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой установлено, что дифференциальное уравнение, связывающее ток и падение напряжения в них соответствует одной фазе и обобщённой однофазной эквивалентной схеме замещения (рис.7).

В данном случае, амплитуда синусоидальной компоненты тока при замкнутом К₁ и к моменту замыкания К (рис. 7)

$$I_m(0) = \frac{U_m}{\sqrt{(R_K + R_H)^2 + \omega(L'_{K'} + L'_{H'})^2}} \quad (8)$$

а активное сопротивление R_{20} при 20°C

$$R_t = R_{20} e^{\alpha(t - 20)}, \quad (9)$$

$$t = \frac{R_t}{R_{20} e^{\alpha}} - 20, \quad (10)$$

где α - температурный коэффициент сопротивления; t – температура.

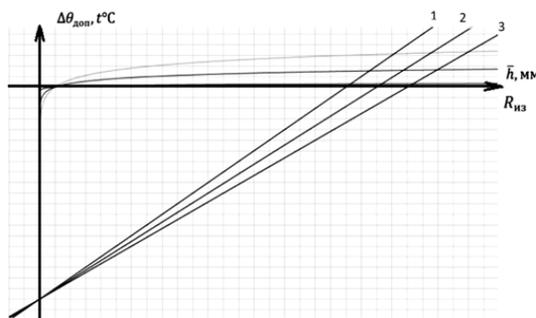


Рис.8. Уровни совместимости

На основании (9) определён закон распределения и график распределения, где точка пересечения функций этих зависимостей показывают уровень совместимости систем диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой (рис. 8), который подтверждает требуемый уровень контроля и управления, надёжности электроснабжения и энергоэффективности их функционирования.

Для расчета статических и динамических характеристик в диссертации использована обобщённая имитационная модель реактивно-вентильного электродвигателя.

В соответствии с алгоритмом (рис. 9) при моделировании выполнен расчет параметров реактивно-вентильного электродвигателя, заданы параметры моделирования, определены режимы работы и проведено определение и расчет напряжения питания и токов фаз с помощью зависимости индуктивности и ЭДС в обмотках, электромагнитный момент, угловая скорость, угол поворота ротора. Результаты расчета выводятся в виде осциллограмм переменных характеристик реактивно-вентильного электродвигателя и динамических

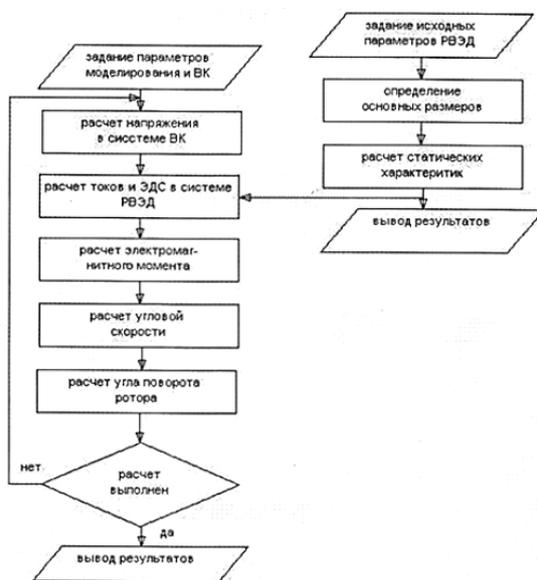


Рис.9

параметров.

Совместное математическое описание механической и приводной частей ЭМС позволяет получить окончательный вариант математического описания ЭМС «вентиляторная установка – реактивно-вентильный электродвигатель»:

$$\begin{aligned}
M - (M_{21} - M_{13}) = J_1 p \omega_1 \quad M_{21} - M_{c2} = J_2 p \omega_2 \quad -M_{13} - M_{c3} = J_3 p \omega_3 \quad pM_{21} = C_{21}(\omega_1 - \omega_2) \quad (11) \\
pM_{13} = C_{13}(\omega_3 - \omega_1) \quad U_j = R \cdot i_j + \frac{d\psi_j(\theta, i_j)}{dt} \quad M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{нр}
\end{aligned}$$

Исследование разработанной математической модели проводилось на ЭВМ с помощью пакета программ Matlab-Simulink.

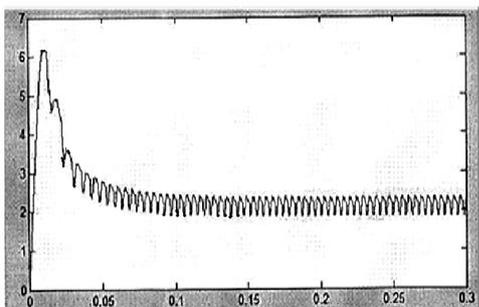


Рис.10

На рис. 10 представлены результаты моделирования переходных процессов реактивно-вентильного электродвигателя, работающего в прямом и обратном режимах, из которых следует, что повышение эффективности функционирования структуры математической модели и обеспечение требуемого уровня чувствительности в генерации энергии при торможении реактивно-вентильного электродвигателя достигнуто за счет введения в него измерительно-генерирующих обмоток.

На основании структурно-функциональных схем (рис.6) установлены передаточные функции элементов, входящих в их состав, где они пронумерованы в соответствии с их номерами:

$$\begin{aligned}
W_1(P) &= \frac{k_1}{T_1 P + 1}, \quad W_2(P) = \frac{k_2}{T_2^2 P^2 + 1}, \quad W_3(P) = \frac{k_3}{T_3^2 P^2 + 1}, \quad W_4(P) = \frac{k_4(T_4 P + 1)}{(T_4 P + 1)T_4 P + k_4}, \\
W_5(P) &= \frac{k_5}{T_5 P + 1}, \quad W_6(P) = \frac{k_6(T_6 P + 1)}{(T_6 P + 1)T_6 P + k_6}, \quad W_7(P) = \frac{k_7}{T_7^2 P^2 + 1}, \quad W_8(P) = \frac{k_8}{1 - T_8^2 P^2}, \\
W_9(P) &= \frac{k_9}{T_9^2 P^2 + 1}, \quad W_{10}(P) = \frac{k_{10}(T_{10} P + 1)}{(T_{10} P + 1)T_{10} P + k_{10}}, \quad W_{11}(P) = \frac{k_{11}(T_{11} P + 1)}{(T_{11} P + 1)T_{11} P + k_{11}}, \\
W_{12}(P) &= \frac{k_{12}}{T_{12} P + 1}, \quad W_{13}(P) = \frac{k_{13}}{T_{13} P + 1}, \quad W_{14}(P) = \frac{k_{14}}{T_{14} P + 1}, \quad W_{15}(P) = \frac{k_{15}}{T_{15} P + 1}, \\
W_{16}(P) &= k_{16}, \quad W_{17}(P) = \frac{k_{17}}{T_{17}^2 P^2 + 1}, \quad W_{18}(P) = \frac{k_{18}}{T_{18} P^2 + 1}, \quad W_{19}(P) = \frac{k_{19}}{T_{19} P^2 + 1}, \\
W_{20}(P) &= k_{20}, \quad W_{21}(P) = \frac{k_{21}}{T_{21}^2 P^2 + 1}, \quad W_{22}(P) = \frac{k_{22}}{T_{22} P + 1}, \quad W_{23}(P) = \frac{k_{23}}{T_{23} P + 1}, \\
W_{24}(P) &= \frac{k_{24}(T_{24} P + 1)}{(T_{24} P + 1)T_{24} P + k_{24}}, \quad W_{25}(P) = \frac{k_{25}}{T_{25} P + 1}, \quad W_{3C1}(P) = k_{3C1} \frac{T_{3C1} P + 1}{T_6 P + 1}, \\
W_{3C2}(P) &= k_{3C2} \frac{T_{3C2} P + 1}{T_6 P + 1}, \quad W_{3C3}(P) = k_{3C3} \frac{T_{3C3} P + 1}{T_6 P + 1}. \quad (12)
\end{aligned}$$

На основе передаточных функций элементов структурной схемы функциональных связей комплексной системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой определяются их конструктивные и режимные параметры.

Зависимости между входными параметрами и выходными, а также оценочными показателями эффективности функционирования устанавливаются моделированием переходных процессов на основе двух способов решения уравнений движений, на основе которых определены их передаточные функции, где прямое решение методом Рунге-Ромберга и структурного моделирования в Matlab.

Структурное моделирование переходных процессов проводилось на основе уравнений движения и переходных функций элементов структуры в Matlab, наиболее распространенном и удобном языке для технических вычислений, который реализован методом Дормонда-Принса.

Контур формирования управляющих воздействий установлен на подчинённое регулирование и настраивается на наибольшее быстродействие, чаще всего на оптимум по модулю.

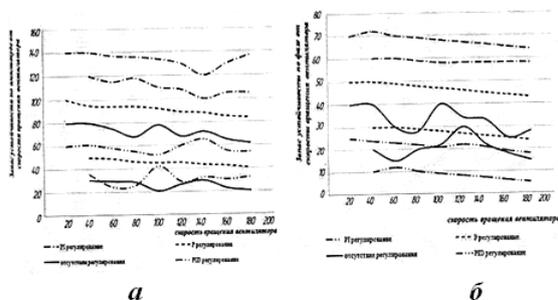


Рис.11. Результаты применения регуляторов P, PI, PID: а - запас устойчивости по амплитуде; б - запас устойчивости по формированию управляющих воздействий

Применение регуляторов P, PI, PID для установленной структурной схемы определяет запас устойчивости по амплитуде, по фазе и времени регулирования, перерегулирования от скорости формирования управляющих воздействий и оценит качество регулирования. На рис.11 (а-б) представлены результаты моделирования на программе Matlab-Simulink.

Анализ полученных результатов приводит к следующему выводу. Оценка запаса устойчивости и качество регулирования через время регулирования, установившееся значение и перерегулирование при использовании регуляторов P, PI, PID по закону регулирования наиболее оптимален P регулятор.

В четвертой главе проведено планирование эксперимента и разработана методика экспериментального соответствия их проведению в производственных условиях. Проводимые испытания основаны на теории подобия физических процессов и составления критериев подобия, обеспечивающих получение требуемого уровня эффективности функционирования при интервале между точками отсчета, который выбран из условия $\bar{P}_n = 0,92$, достаточности объема $n=103$.

Определены критерии подобия путем приведения уравнений математической модели конструктивной схемы (рис.6) на основе функциональных связей её элементов и устройств к безразмерному виду способом интегральных аналогов.

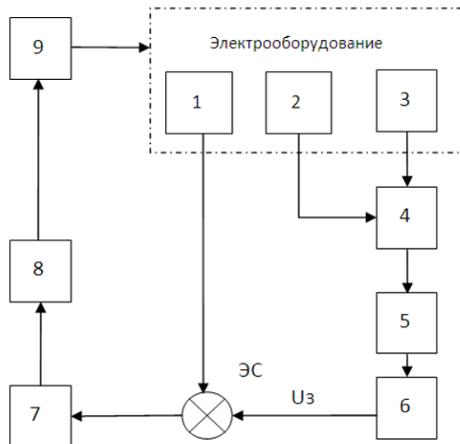


Рис. 12

На рис.12 представлен схема разработанного стенда и аппаратура экспериментальных исследований системы непрерывного контроля и управления режимами работы электрооборудования силовой электрической подстанции в условиях эксплуатации, которая работает в следящем режиме. С помощью обработки сигнал от детектора частичного разряда и сигнал от анализатора диэлектрических потерь и ёмкости входят в ЭВМ, где разрабатывают сигнал управления накопителем и ТПЧ с видеоизменяемой для регулирования параметров питания системы.

На рис. 12: 1 - датчик напряжения; 2 –детектор частичного разряда; 3 - анализатор диэлектрических потерь и ёмкости; 4-аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором; 5 - интерфейс; 6- компьютер;7 –блок управления накопителя;8- накопитель; 9- перестраиваемый ТПЧ; ЭС – элемент сравнения.

Данные экспериментальные исследования были произведены на трёх ТП: Встроенная ТП 10/0,4 кВ, комплексная ТП 10/0,4 кВ и ТП 10/0,4 кВ.

В результате произведённых измерений на первом стенде (рис. 12) были получены трёхмерные диаграммы характеризующие частоту, мощность и расположение фазового угла частичных разрядов. Для упрощения извлечения статистических данных трёхмерные модели частичных разрядов были заменены серыми двумерными изображениями.

Статистические данные характеризующие частичных разрядов полученные в результате замеров на ТП приведены в Таб. 2

Таблица 2

	Sk	Ku	Cv	r
В.В. ввод тр-ра ТСЭГЛФ-1000/10-У3	13.151	224.64	10.636	0.2321
В.В. ввод тр-ра ТМГ11-1000/10У1	12.112	205.33	9.9834	0.2619
В.В. ввод тр-ра ТМ-1000/10	12.287	219.49	9.7452	0.2453

Данные полученные в ходе опросов характеризуют уровень частичных разрядов в изоляции высоковольтных вводов обследованных ПС, таким образом, загрузив полученные данные на входы нейронной сети описанной во второй главе, получим вывод о том, что в высоковольтных вводах отсутствуют значимые частичных разрядов и ими можно пренебречь.

Проводимые работы и испытания основаны на минимуме расходуемых ресурсов числа испытаний, обеспечивающих получение требуемых показаний надёжности путём исследования функциональной избыточности. В качестве показателя функциональной избыточности в параметрической модели устройства генерации электроэнергии при торможении реактивно-вентильного электродвигателя и системы регулирования охлаждения силовой подстанции, принят коэффициент запаса (надёжности). Планирование эксперимента и предлагаемая методика соответствуют проведению в лабораторных условиях. Разработанный стенд с аппаратурой экспериментальных исследований для устройства генерации электроэнергии при торможении реактивно-вентильного электродвигателя и системы регулирования охлаждения силовой подстанции представлены на рис. 13.

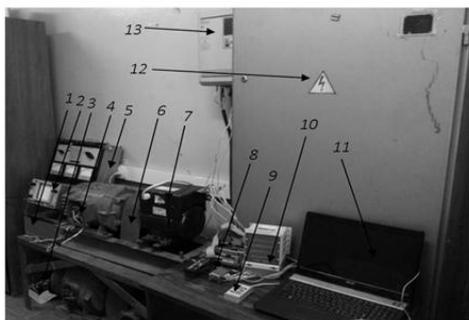


Рис. 13

На рис. 13:1- источник квадратурных токов для формирования измерительной ЭДС, состоящий из двух линейных источников тока, выполненных на транзисторах и операционном усилителе, и генератора квадратурных сигналов; 2-осциллограф; 3- суперконденсатор системы рекуперации электрической энергии; 4-генератор, для моделирования генераторного режима реактивно-вентильного электродвигателя; 5-

датчики тока и напряжения; 6-муфта с механическим тормозным устройством; 7-реактивно-вентильный электродвигатель, с блоком коммутации; 8-блок драйверов для управления микропроцессорной системой управления; 9-пульт управления генератором; 10-микропроцессорная система управления; 11-ЭВМ для формирования управляющих воздействий и сбора данных; 12-ВРУ с блоками питания и защитной автоматикой; 13-частотный преобразователь для регулирования скорости вращения генератора.

Аппаратура, разработанная на базе ПЭВМ, включает аналогово-цифровой преобразователь и комплект датчиков, обеспечивающих измерения мгновенных значения тока, напряжения и частоты вращения двигателя.

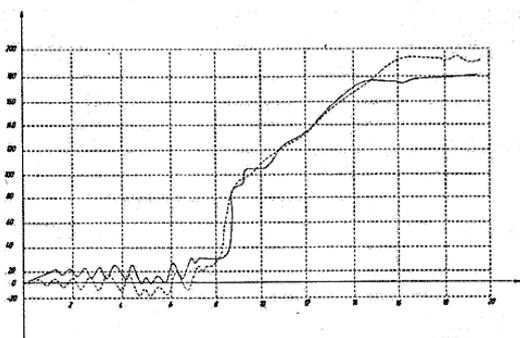


Рис.14

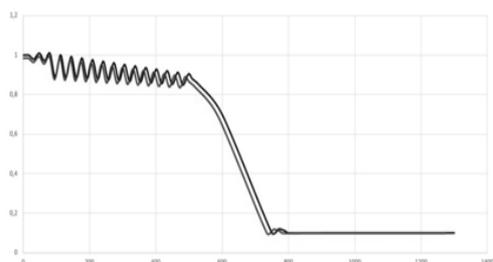


Рис.15

Производилась запись тока статора, изменение величины которого пропорционально изменению величины момента (рис.14). Сравнение результатов замеров и расчетов моделей показывает, что относительная погрешность не превышает 15% и мощность электродвигателя снизилась до 25%, т.е. имеет место снижение энергозатрат.

Результаты экспериментальных исследований, обработанных ЭВМ показаны на рис. 15.

Сравнение результатов замеров при экспериментальных исследованиях и расчёт показывает, что относительная погрешность не превышает 15%.

Разработана физическая модель конструктивной схемы, учитывающая функциональные связи комплексной системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой с учетом зависимостей параметров, характеризующих процесс работы, и, стенды для физического моделирования структуры управления ими, проведены экспериментальные исследования на основе критериев подобия и оценки правильности и эффективности результатов теоретических исследований и разработанных новых технических решений по реализации следящей системы контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций, где эффективность достигла 20-25%, и, экспериментальные исследования подтвердили, что расхождения между расчётными и экспериментальными результатами исследований составили 14,5%, что допустимо в инженерных расчётах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена задача обоснования рациональных параметров конструктивных схем комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой на основе структуры функциональных связей её элементов и функциональных модулей, и, топологии управления ими, обеспечивающих снижение энергоёмкости, повышение надёжности и эффективности их функционирования.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Продление срока службы электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций обеспечивается путём комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления их режимами работы и переходными процессами в них.

2. Определены зависимости для расчёта комплексного диагностического параметра – тангенса угла диэлектрических потерь, учитывающего характеристики переходных процессов и режимов работы для повышения надёжности и эффективности функционирования силовых подстанций.

3. Определены закономерности формирования топологии и управляющих воздействий комплексной системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой, а также условий реализуемости для расчёта их параметров, обеспечения требуемого уровня формирования режимов работы и переходных процессов.

4. Обоснованы структура и рациональные параметры системы диагностики технического состояния электрооборудования и электротехнических устройств силовых подстанций под нагрузкой и управления режимами их работы.

5. Определены функциональные связи комплексной системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой.

6. Разработаны математические модели структуры функциональных связей комплексной системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой.

7. Разработаны новые технические решения по обеспечению непрерывного контроля и управления режимами работы и регулированию режима охлаждения электрооборудования силовых подстанций в условиях эксплуатации, а также методика прогнозирования планово-предупредительного ремонта, учитывающие в комплексе физические процессы, протекающие в электротехнических устройствах и внешние факторы, влияющие на формирование остаточного ресурса с учётом их технических особенностей.

8. Установлены условия реализуемости конструкционной и функциональной надёжности, и, обоснованы рациональные параметры комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой.

9. Численные и экспериментальные исследования режимов работы комплексной следящей системы диагностики, контроля и управления электрооборудованием и электротехническими устройствами силовых подстанций под нагрузкой, выполненные на основе разработанных их имитационных и физических моделей подтвердили, что расхождение между ними составило 14,5%, а эффективность функционирования достигла 20-25%.

Публикации по теме диссертации:

1. Свистунов Н.А. Принципы построения систем релейной защиты и автоматики на основе микропроцессорных устройств / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 12-3. С. 92-95.

2. Свистунов Н.А. Выбор измерительных трансформаторов тока, используемых дифференциальной релейной защитой / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12-1. С. 113-117.

3. Степанов В.М., Свистунов Н.А. Анализ конструктивных схем дифференциальной защиты силовых трансформаторов от короткого замыкания / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12-1. С. 104-109.

4. Степанов В.М., Свистунов Н.А. Диагностика и управление режимами работы электромеханических и электротехнических систем автономных источников электроэнергии для собственных нужд газораспределительных объектов / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. №12. С. 96-99.

5. Свистунов Н.А. Анализ методов диагностики технического состояния электротехнических устройств, основанные на обнаружении и измерении уровня частичных разрядов / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. №12. С. 100-102.

6. Свистунов Н.А., Зеленков А.Н. Обоснование расчетного значения нагрузки фазы трансформатора тока / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. №12. С. 103-105.

7. Степанов В.М., Свистунов Н.А., Михальченко С.Н. Сравнительный анализ тиристорного преобразователя частоты с видоизменяемой топологией / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. №11. С. 35-38.

8. Степанов В.М., Свистунов Н.А. Обобщенная структура устройства непрерывного контроля и управления режимами работы электрооборудования силовой электрической подстанции в условиях эксплуатации / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. №11. С. 20-22.

9. Степанов В.М., Свистунов Н.А. Устройство непрерывного контроля и управления режимами работы электрооборудования силовой электрической подстанции в условиях эксплуатации: пат. 196100 Российская Федерация. 2020., Бюл. № 5

10. Степанов В.М., Свистунов Н.А. Устройство регулирования режима охлаждения электрооборудования силовой электрической подстанции: пат. 2428285 Российская Федерация. 2020., Бюл. № 22